



# Effect of Alkali Treatment on the Mechanical Properties of Date Palm Fibers and their Adhesion to Epoxy Resin

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Ravandi M.<sup>1\*</sup>

Dariushi S.<sup>2</sup>

Batani A.<sup>3</sup>

### How to cite this article

Ravandi M, Dariushi S, Batani A. Effect of Alkali Treatment on the Mechanical Properties of Date Palm Fibers and their Adhesion to Epoxy Resin. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(12):811-822.

<sup>1,3</sup>Department of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

<sup>2</sup>Composite group, polymer processing faculty, Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran.

### \*Correspondence

Address: No.7 Pardis Alley, Vanak Square, Tehran, Iran, Postal Code:19395-1999.

Phone: -

Fax: -

ravandi@kntu.ac.ir

### Article History

Received: April 04, 2021

Accepted: June 27, 2021

Published: October 15, 2021

## ABSTRACT

The fibers of date palms, which are widely available in the south of Iran, are a variety of natural fibers that can be used as a reinforcement in polymer composites. This work investigates the effect of alkali treatment on the mechanical properties of date palm fibers and their adhesion to thermoset polymer. The sodium hydroxide (NaOH) solution at three different concentrations (1 wt%, 3 wt%, and 5 wt%) was used to treat the fibers. The single fiber tensile test and fiber pull-out tests were performed to measure the mechanical properties and fiber/matrix interfacial shear strength, respectively. Comparing the SEM images of the untreated and treated fibers showed that the 3% NaOH treatment could effectively remove non-cellulosic materials, i.e. lignin and wax, with minimum damage to the fiber surface. The experimental results showed a clear improvement of the mechanical properties and fiber/matrix adhesion after treatment. It was found that the 3% NaOH solution is the optimal concentration to achieve the maximum improvement in the fiber and bonding properties.

**Keywords** Natural fibers, Date palm fibers, Alkaline treatment, Pull-out test, Interfacial shear strength

## CITATION LINKS

[1] Green composites made of bamboo fabric and poly (lactic) acid... [2] The pull-out behavior of chemically treated lignocellulosic... [3] Natural fibre composites. [4] Effect of betelnut fibres treatment and contact conditions... [5] The effects of through-the-thickness stitching... [6] Performance of interlaminar flax-carbon hybrids... [7] Biocomposites reinforced with natural fibers. [8] Plant fibre-reinforced polymers... [9] Bamboo fibres for reinforcement in composite materials... [10] Green composites: a review. [11] Investigation of microstructure and tensile properties... [12] The potential of using date palm fibres... [13] Mechanical properties of date palm fiber... [14] Natural fiber reinforced polymer composites... [15] Chemical composition and pulping of date palm... [16] Properties and performance of natural-fibre composites. [17] Chemical analysis of different parts of date palm... [18] Characterization of treated date palm tree fiber... [19] Sustainable Composites for Lightweight Applications. [20] Investigating the effects of liquid-plasma treatment... [21] Effect of oxygen plasma treatment on tensile strength... [22] The mechanical, hygral, and interfacial strength of continuous bamboo fiber... [23] The Effects of Alkali Treatment on the Mechanical and Chemical Properties... [24] The effects of alkali treatment on the interfacial adhesion of bamboo fibres... [25] Plant-based natural fibre reinforced composites... [26] Investigation on interfacial adhesion of date palm/epoxy... [27] The effect of alkali treatment on mechanical... [28] Investigation of Cis Palamfiber on the mechanical properties... [29] Physico-mechanical and thermal properties... [30] Improving the properties of UD flax fibre reinforced composites... [31] The effect of alkalization and fibre alignment on the mechanical... [32] A study of the mechanical properties of... [33] Biocomposites. Polymer Science... [34] Morphological aspects and mechanical properties... [35] Exploring the potential of waste leaf sheath date palm... [36] ANN for tribological applications. [37] Tensile, flexural and torsional properties... [38] Development and characterisation of low-cost polymeric... [39] Surface modifications of natural fibers and performance... [40] Effect of diameters and alkali treatment... [41] Development and characterization of thermal insulation materials... [42] An investigation on tensile, compression and flexural properties... [43] Natural fibers, biopolymers, and biocomposites... [44] Effect of fiber surface treatment on the fiber-matrix...

## مطالعه تجربی اثر فرآوری قلیایی بر خواص مکانیکی الیاف نخل خرما و چسبندگی آن با رزین اپوکسی

محمد راوندی

گروه طراحی کاربردی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ایران

سهیل داریوشی

گروه کامپوزیت، پژوهشکده فرآیند پلیمرها، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران

احمد باطنی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی، تهران، ایران

### چکیده

الیاف موجود در قسمت های مختلف نخل خرما، که از گیاهان بومی زیست اقلیم جنوب ایران است، از انواع الیاف طبیعی به شمار می‌روند که می‌توان از آنها به عنوان تقویت کننده کامپوزیت های پلیمری بهره جست. در این پژوهش اثر فرآوری قلیایی بر روی خواص مکانیکی الیاف نخل خرما و چسبندگی آن با پلیمر گرماسخت مورد مطالعه تجربی قرار گرفته است. از محلول سدیم هیدروکسید (NaOH) در سه غلظت ۱٪، ۳٪، و ۵٪ برای فرآوری قلیایی الیاف استفاده شده است. خواص مکانیکی الیاف بوسیله تست کشش تک لیف و استحکام برشی در فصل مشترک الیاف و ماتریس بوسیله تست Pull-out اندازه گیری شد. بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) سطح الیاف نخل خرما قبل و بعد از فرآوری نشان دهنده بهبود کیفیت سطح الیاف و حذف لایه های لیگنین و واکس پس از فرآوری با غلظت ۳٪ بود. همچنین، فرآوری باعث افزایش معناداری در استحکام کششی، مدول الاستیسیته و کرنش شکست الیاف گردید. نتایج تست Pull-out و بررسی تصاویر SEM سطح الیاف پس از تست نیز نشان دهنده افزایش چسبندگی ماتریس به الیاف بعد از فرآوری بود. بیشترین میزان افزایش در خواص مکانیکی و چسبندگی الیاف و ماتریس در غلظت ۳٪ مشاهده شد.

**کلیدواژه ها:** الیاف طبیعی، الیاف نخل خرما، فرآوری قلیایی، تست Pull-out، استحکام برشی سطح مشترک

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۶

\* نویسنده مسئول: ravandi@kntu.ac.ir

### ۱- مقدمه

در چند دهه اخیر، نگرانی در مورد آلودگی های زیست محیطی، بازیافت مواد و تغییر سیاست بهره برداری از منابع انرژی با رویکرد کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی و مشتقات آن، توجه محققین را به استفاده هرچه بیشتر از مواد بدست آمده از منابع تجدیدپذیر مانند الیاف گیاهی سلولزی و لیگنوسلولزی جلب کرده است [1-3]. زیست تخریب پذیری، قابلیت بازیافت، قیمت پایین، وزن و چگالی کم و خواص مکانیکی ویژه بالا، الیاف سلولزی را به یک جایگزین مناسب برای الیاف مصنوعی در کامپوزیت های پلیمری برای بسیاری از مصارف غیر سازه ای تبدیل کرده است [4-6].

کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با الیاف گیاهی در سازه های زیادی استفاده می شوند. به عنوان مثال در سال ۲۰۱۲ بیش از ۹۸٪ کامپوزیت های تقویت شده به وسیله الیاف گیاهی در اتحادیه اروپا، در صنعت خودروسازی و در قطعاتی که نیاز به تحمل زیاد بار نیست (مانند: درب ها، داشبوردها، کفی ها و...) استفاده شده است [3,7]. اما وجود برخی معایب استفاده از الیاف گیاهی را محدود می کند. به عنوان مثال استحکام کششی الیاف گیاهی دارای پراکندگی زیاد می باشد. این پراکندگی برای الیاف استخراج شده از یک گیاه نیز وجود دارد که پراکندگی ذاتی عیوب و تغییرات قطر در طول الیاف می تواند از دلایل آن باشد [8,9]. تمایل به جذب آب، خواص مکانیکی پایین، ترشوندگی کم و چسبندگی ضعیف با ماتریس های پلیمری از دیگر معایب الیاف گیاهی است [10]. ساختار الیاف گیاهی به گونه ای است که از چند الیاف ابتدایی تشکیل شده اند. الیاف ابتدایی خود متشکل از چند دیواره سلولی از جنس سلولز (Cellulose)، همی سلولز (Hemicellulose) و لیگنین (Lignin) است. در این ساختار میکروفیبریل های (Microfibril) سلولزی به وسیله همی سلولز و لیگنین در دیواره سلولی قرار گرفته اند. خواص مکانیکی الیاف گیاهی مانند مدول الاستیسیته، کرنش شکست و استحکام به چگالی الیاف ابتدایی و زاویه میکروفیبریل ها نسبت به محور الیاف در ضخیم ترین لایه که اکثر این میکروفیبریل ها در آن قرار دارند، وابسته است. کم بودن زاویه میکروفیبریل موجب افزایش مدول الاستیسیته و استحکام الیاف می شود [11].

یکی از انواع الیاف گیاهی، الیاف استحصال شده از نخل خرما (Phoenix Dactylifera) است. زیست گاه نخل خرما در مناطق گرمسیری است و بیشتر در خاورمیانه (کشورهایی مانند مصر، ایران، عربستان، عراق)، شمال آفریقا، هند، پاکستان و ایالات متحده امریکا وجود دارد [12]. طبق گزارش وزارت جهاد کشاورزی مناطق وسیعی از جنوب ایران دارای شرایط آب و هوایی مناسب برای کاشت درختان نخل است به نحوی که در ۱۵ استان ایران خرما کشت می شود و ایران در رتبه چهارم تولید خرما جهان قرار دارد [13]. سالیانه حدود ۱۷ تا ۲۰ کیلوگرم ضایعات سلولزی، عموماً به صورت الیاف، به ازای هر نخل تولید می شود. این الیاف بصورت ضایعات اغلب توسط کشاورزان سوزانده شده و یا به عنوان زباله دور ریخته می شوند [14,15]. با در نظر گرفتن این مساله که حدود ۲۵۰ هزارهکتار از اراضی کشور به کشت درختان نخل اختصاص دارد، می توان فهمید که میزان تولید الیاف نخل در ایران در مقایسه با سایر الیاف طبیعی بسیار زیاد است. همین امر باعث می شود این الیاف قیمت تمام شده پایینی داشته باشند. این ضایعات از قسمت های مختلف نخل خرما مانند شاخه ها (Rachis)، خوشه ها (Petiole) و برگ ها (leaf) به دست می آیند. یکی از انواع ضایعات نخل خرما که غنی از الیاف طبیعی است، پوشش انتهایی شاخه های درخت نخل (leaf Sheath) می باشد که از الیاف متقاطع با

تاکنون پژوهش‌های بسیاری در سراسر دنیا بر روی کاربردهای مختلف الیاف نخل انجام شده است [25]. الاوار و همکاران [18] تاثیر فرآوری قلیایی و اسیدی بر روی خواص مکانیکی الیاف نخل خرما را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان دهنده بهبود چشمگیر خواص مکانیکی الیاف پس از فرآوری با محلول سدیم هیدروکسید و کاهش خواص پس از فرآوری با محلول هیپروکلریک اسید بود. شلوان و همکاران [26] به بررسی تاثیر قطر بر روی خواص مکانیکی الیاف نخل خرما پرداختند. آنها الیاف فرآوری شده به وسیله سدیم هیدروکسید را در سه قطر مختلف تحت تست کشش قرار دادند که نتایج نشان داد با افزایش قطر الیاف خواص مکانیکی کاهش می‌یابد. اوشابی و همکاران [27] تاثیر فرآوری قلیایی با سدیم هیدروکسید بر روی چسبندگی بین الیاف نخل خرما و ماتریس گرمانرم پلی اورتان را به وسیله تست Pull-out بررسی کردند که نتایج آنها از بهبود استحکام برشی در سطح مشترک (IFSS) حکایت داشت.

با توجه به حجم بالای تولید سالانه الیاف نخل خرما به صورت ضایعات در جغرافیای کشور ایران در کنار مزیت‌های ذاتی، اهمیت این الیاف را در مقایسه با دیگر الیاف طبیعی غیر بومی جهت استفاده در ساخت کامپوزیت‌ها دو چندان می‌کند. از اینرو، در ایران نیز پژوهشگران از الیاف نخل خرما برای ساخت و تقویت خصوصیات مکانیکی مواد مختلفی مانند خشت و بتن، تخته‌های چند لایه و کامپوزیت‌های زمینه پلیمری استفاده کرده‌اند [28,29]. اما متاسفانه پتانسیل بالای موجود در ایران در رابطه با الیاف نخل با میزان پژوهش‌های انجام گرفته همخوانی ندارد. از سوی دیگر، تفاوت در مناطق آب و هوای و جغرافیایی کشت یک نوع الیاف گیاهی، عموماً باعث تفاوت در ترکیبات شیمیایی (مانند درصد متفاوت سلولز، همی سلولز و لیگنین) و در نتیجه تفاوت در خواص و رفتار مکانیکی آنها می‌شود. از این رو لازم است که به منظور تعیین بهترین کاربرد برای الیاف نخل با توجه به منطقه رویش، نوع و رسته گیاه و نیز قسمتی از گیاه که الیاف از آن استخراج شده، مطالعات اولیه برای شناسایی ویژگی‌های الیاف انجام شود. در این تحقیق، تاثیر فرآوری قلیایی با استفاده از سدیم هیدروکسید بر روی خواص مکانیکی، ساختار سطح الیاف نخل خرمای کشت شده در استان کرمان، و چسبندگی این الیاف با پلیمر اپوکسی، با هدف توسعه استفاده از آنها در ساخت کامپوزیت‌های طبیعی، مورد مطالعه قرار گرفته است. اثر فرآوری قلیایی در غلظت‌های مختلف بر استحکام کششی الیاف و استحکام برشی در سطح مشترک آنها با پلیمر اپوکسی، بعنوان یک ماتریس پرکاربرد در صنعت ساخت کامپوزیت، با استفاده از تست کشش و تست Pull-out مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، برای بررسی ریز ساختار الیاف و نحوه اتصال الیاف و ماتریس از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شده است.

قطرهای متفاوت پوشیده شده است و مانند بافت تارپودی از میان یکدیگر عبور کرده‌اند. در دسته بندی عمومی انواع الیاف گیاهی، الیاف نخل خرما ذیل دسته برگ (Leaf) طبقه بندی می‌شوند [16].

شناخت ترکیب شیمیایی الیاف طبیعی در درک بهتر رفتار مکانیکی آنها از اهمیت زیادی برخوردار است. درصد کمتر مقدار سلولز در الیاف نخل خرما نسبت به الیاف شناخته شده طبیعی مانند کف (Hemp)، کتان (Flax) و سیسال (Sisal) سبب کمتر بودن استحکام و مدول الاستیسیته این الیاف شده است. در مقابل، با توجه به ساختار مولکول‌های سلولز، کمتر بودن محتوای سلولزی در الیاف خرما سبب جذب کمتر آب توسط این الیاف شده است [16]. علاوه بر مزیت جذب رطوبت کمتر، مقاومت و پایداری حرارتی بالا در کنار چگالی کمتر الیاف خرما نسبت به بیشتر الیاف طبیعی، این الیاف را به گزینه بسیار مناسب بعنوان پرکننده یا تقویت کننده در کامپوزیت‌های پلیمری تبدیل کرده است [19].

در دو دهه اخیر مطالعات زیادی در مورد خواص مکانیکی الیاف طبیعی، بهبود خواص آنها، و چسبندگی در سطح مشترک الیاف گیاهی و ماتریس پلیمری انجام شده است. همچنین، به منظور از بین بردن ناخالصی‌ها روی سطح الیاف، بهبود خواص مکانیکی الیاف و افزایش چسبندگی بین الیاف طبیعی و ماتریس پلیمری، بسته به نوع الیاف و ماتریس، روشهای فرآوری مختلفی پیشنهاد شده است [18,20-22]. پوترا و همکاران [20] برای فرآوری الیاف نارگیل، روش پلاسمای مایع را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که این فرآوری سبب افزایش استحکام برشی در سطح مشترک (IFSS) می‌شود. بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) الیاف نشان داد که از بین رفتن لیگنین و ناخالصی‌های سطح موجب افزایش قفل شونده مکانیکی میان الیاف و ماتریس اپوکسی شده است. در مقابل، این فرآوری باعث کاهش خواص مکانیکی الیاف شد. زین و همکاران [23] نشان دادند فرآوری قلیایی با سدیم هیدروکسید (NaOH) در غلظت‌های مختلف سبب بهبود استحکام و مدول الاستیسیته الیاف می‌شود. همچنین نتایج تست بیرون کشیدن فایبر از ماتریس (Pull-out) نشان داد که با افزایش غلظت محلول و زمان فرآوری، استحکام برشی در سطح مشترک (IFSS)، افزایش می‌یابد. نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش زبری سطح و از بین رفتن آلودگی‌های سطح بعد از فرآوری منجر به افزایش چسبندگی سطحی و ایجاد قفل شونده مکانیکی می‌شود. در مطالعه دیگری، ونگ و همکاران [24] نشان دادند فرآوری قلیایی باعث کاهش استحکام و مدول الاستیسیته در الیاف بامبو می‌شود. همچنین بررسی تصاویر SEM پس از فرآوری نشان دهنده از بین رفتن همی سلولز، لیگنین و موم روی سطح و افزایش زبری سطح بود. انجام تست Pull-out نشان داد استحکام برشی در سطح مشترک با فرآوری و افزایش غلظت محلول سدیم هیدروکسید افزایش یافته است.

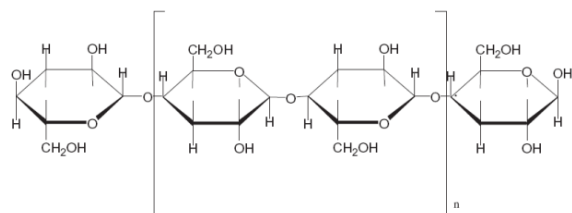
## ۲- انجام آزمایش

### ۱-۲ مواد

در این مطالعه از الیاف نخل خرما به دست آمده از ضایعات نخلستان‌های جیرفت در استان کرمان، استفاده شد. این الیاف مطابق شکل ۱ از پوشش انتهایی شاخه های نخل (Sheath fibers) استخراج شده است. برای استخراج الیاف نخل از داخل مش، بترتیب مراحل زیر انجام شده است. ابتدا به منظور ازبین رفتن لایه نازک واکس که تار و پود الیاف را پوشانیده است، روی آن به آرامی با کاغذ سمباده P1200 سمباده زده شد. سپس این مش‌ها به مدت نیم ساعت بر روی بخار آب و به مدت ۱ ساعت داخل آب در حال جوشیدن قرار گرفتند. بلافاصله پس از خروج مش از آب جوش، به آرامی و با دقت بسیار زیاد الیاف موجود در آن از هم جدا شدند. لازم به ذکر است که در این مرحله از کمترین نیروی لازم استفاده شد تا آسیب به الیاف به حداقل برسد. در نهایت، الیاف استخراج شده به مدت ۲ ساعت داخل آون (Oven) با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا رطوبت از آنها خارج شده و خشک شوند. برای فرآوری الیاف از سدیم هیدروکسید (NaOH) و آب مقطر استفاده شد. به عنوان ماتریس گرماسخت، از رزین LR630 و سخت‌کننده LH630 با نسبت اختلاط وزنی ۱۰ به ۳ استفاده شد. گرانروی این رزین و هاردنر در حالت مخلوط در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد ۵۰۰-۷۰۰ سانتی‌پواز می‌باشد که برای تزریق در قالب مناسب است.

### ۲-۲ فرآوری الیاف

همه الیاف طبیعی دارای یک ساختار کریستالی هستند که بخش عمده آن را سلولز تشکیل داده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، سلولز یک پلی ساکارید طبیعی است که از اتم‌های کربن، اکسیژن و هیدروژن تشکیل می‌شود. خواص نهایی الیاف علاوه بر سلولز تحت تاثیر اجزاء غیر سلولزی مانند لیگنین و



شکل ۲) ساختار شیمیایی سلولز<sup>[25]</sup>

پکتین نیز قرار دارد. با توجه به حضور گروه‌های هیدروکسیل در ساختار سلولز و ذات آبدوست الیاف طبیعی، یکی از مهمترین خواص این الیاف قابلیت جذب آب بسیار بالا است<sup>[25]</sup>.

فرآوری قلیایی با محلول سدیم هیدروکسید (NaOH) یکی از قدیمی ترین، ارزان ترین، و کارآمدترین روشهای شستشو و فرآوری الیاف طبیعی در صنعت نساجی می باشد. در صنعت کامپوزیت های طبیعی، فرآوری قلیایی معمولا به منظور آماده سازی سطح الیاف و افزایش قابلیت اتصال الیاف به ماتریس انجام می‌شود. محلول سدیم هیدروکسید (NaOH) با حل کردن ناخالصی ها، واکس، لیگنین و پکتین از سطح الیاف باعث بهبود کیفیت آن می شود. علاوه بر بهبود کیفیت سطح الیاف، فرآوری قلیایی با محلول سدیم هیدروکسید (NaOH) با کاهش خاصیت آب دوستی الیاف، مقاومت آن را در برابر جذب رطوبت بالا می برد. در واقع محلول سدیم هیدروکسید (NaOH) با تاثیرگذاری مستقیم بر روی سلولز و حذف گروه‌های هیدروکسیل (OH)، باعث تبدیل شبکه سلولزی اولیه (Cellulose-I) به ساختار کریستالی پایدارتر Cellulose-II می شود<sup>[30]</sup>.

از سوی دیگر، به منظور حفظ مزیت مقرون به صرفه بودن الیاف بدست آمده از ضایعات نخل خرما، هزینه روش انتخاب شده برای فرآوری الیاف نیز باید متناسب باشد. ازاینرو، محلول سدیم هیدروکسید (NaOH) یکی از اولین انتخاب های فرآوری الیاف می باشد.

در این مطالعه، بر اساس مطالعات پیشین<sup>[12,18,31-33]</sup> برای افزایش خواص مکانیکی و بهبود کیفیت سطوح الیاف از فرآوری قلیایی با سدیم هیدروکسید (NaOH) استفاده شد. برای این منظور محلولی از ترکیب آب مقطر و سدیم هیدروکسید در غلظت‌های ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی تهیه شد. برای انجام فرآیند فرآوری، الیاف به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق داخل محلول‌ها قرار گرفت. سپس الیاف از محلول خارج و با آب مقطر شسته شد. در نهایت، برای خشک کردن و خروج رطوبت، الیاف به مدت ۲ ساعت در آون با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت.

### ۲-۳ ساخت نمونه ها

برای بررسی خواص مکانیکی الیاف خام و فرآوری شده نخل خرما از فریم کاغذی با طول موثر (gauge length) مشخص استفاده شد<sup>[11,34]</sup>. فریم های کاغذی مطابق شکل ۳ آماده سازی شدند. برای نصب الیاف به فریم کاغذی، ابتدا یک لیف به صورت صاف



شکل ۱) الف) تار و پود در هم تنیده الیاف در پوشش انتهایی شاخه های نخل خرما، ب) الیاف استخراج شده

داخل حفره‌های قالب گذاشته شد و مخلوط رزین و هاردنر، همانند شکل ۴ به وسیله سرنگ داخل قالب تزریق شد. سپس قالب به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار گرفت تا ماتریس پخت شود و پیوند با الیاف ایجاد گردد. پس از خارج کردن نمونه‌ها از قالب، نمونه‌ها از لحاظ قرارگیری الیاف در داخل رزین بررسی و نمونه‌های مناسب برای انجام تست انتخاب شدند. به منظور قرار گرفتن صحیح نمونه‌ها در داخل فک دستگاه برای انجام تست Pull-out، انتهای آزاد الیاف به یک فریم کاغذی یکطرفه به نحوی که طول خارج از ماتریس ۲۰ میلی متر باشد چسبانده شد.

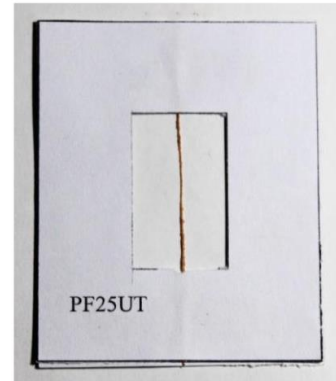
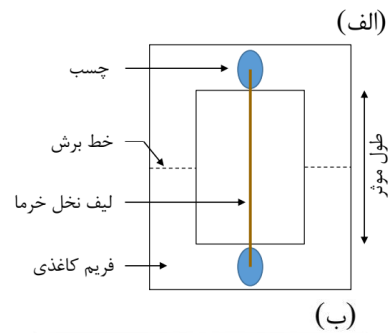
بعد آماده سازی نمونه‌ها، از یک میکروسکوپ دیجیتالی برای اندازه گیری قطر الیاف در هر دو تست استفاده شد. در اندازه گیری قطر الیاف فرض دایروی بودن سطح مقطع الیاف لحاظ گردید [35]. براساس نتایج اندازه گیری تمامی نمونه، قطر الیاف استفاده شده دارای توزیع نرمال با میانگن ۱۸۵ میکرومتر و انحراف معیار ۴۶ میکرومتر بود.

#### ۲-۴- تست کشش تک لیف

خواص مکانیکی الیاف (استحکام نهایی، مدول الاستیسیته، کرنش نهایی و غیره) با استفاده از تست کشش محوری تعیین می‌شوند. این کار به وسیله یک دستگاه تست کشش یونیورسال Santam STM-150 با استفاده از یک سنسور نیروی 100kg انجام شد. دو طرف فریم‌های کاغذی ساخته شده پس از قرار گرفتن در گیره‌های دستگاه بریده شدند و آزمایش با سرعت 1 mm/min انجام شد. برای افزایش دقت، با قرار دادن کاغذ سمباده در فک‌ها سعی شد تا هم از آسیب زبری سطح فک‌ها به الیاف و همچنین از لغزش نمونه در فک‌ها جلوگیری شود. با توجه به عدم قطعیت بالا در خواص الیاف طبیعی و به منظور افزایش دقت داده‌های آماری، ۲۰ تست موفق برای هر نمونه انجام شد.

#### ۲-۵- تست Pull-out

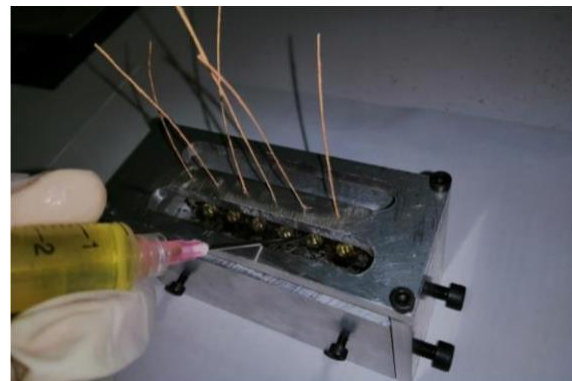
برای بررسی چسبندگی بین الیاف و ماتریس و محاسبه حداکثر استحکام برشی در سطح مشترک از تست Pull-out استفاده می‌شود. برای انجام این تست فیکسچری مطابق شکل ۵-الف طراحی و ساخته شد. این فیکسچر دارای یک زبانه در قسمت پایین است که در گیره پایینی دستگاه تست کشش ثابت می‌شود. قسمت بالای فیکسچر دارای دو تیغه می باشد که یکی ثابت و دیگری به وسیله یک پیچ قابلیت جابجایی افقی و تنظیم موقعیت را دارد. برای انجام تست، ابتدا نمونه تست ساخته شده در فک بالایی دستگاه ثابت می‌شود. سپس، قسمت ماتریس نمونه در زیر تیغه‌ها قرار گرفته و پس از تنظیم موقعیت تیغه‌ها، آزمایش انجام می‌شود (شکل ۵ب). این تست به وسیله یک دستگاه تست کشش یونیورسال Santam STM-150 با استفاده از یک سنسور نیروی 100kg با سرعت 1 mm/min انجام شد. برای هر حالت حداقل ۶ تست موفق انجام شد.



شکل ۳ (الف) شماتیک فریم کاغذی و فیبر چسبیده به آن برای تست کشش محوری، (ب) نمونه تست کشش تک لیف

و بدون پیش کشش بر روی فریم اول قرار داده شده و بوسیله super glue در دو انتها به آن متصل می‌شود. سپس، فریم دوم همراستا با فریم اول بروی آنها چسبانده می‌شود. این کار تا حد بسیار زیادی الیاف را صاف و محکم نگه می‌دارد و از شکست الیاف در خارج از طول موثر جلوگیری می‌کند. در این مطالعه، نمونه‌های تست کشش الیاف خام و فرآوری شده در سه غلظت مختلف در طول ۲۵ میلی متر ساخته شدند.

برای ساخت نمونه‌های تست Pull-out، قالبی مطابق شکل ۴ ساخته شد که دارای حفره‌های استوانه‌ای به قطر ۵ میلی متر و ارتفاع موثر ۴ میلی متر است. این قالب همچنین دارای یک صفحه سوراخ‌دار در بالای حفره‌هاست که الیاف را به شکل ایستاده و دقیقاً در راستای محور حفره‌های استوانه‌ای نگه می‌دارد. در ابتدا حفره‌های قالب به ماده رهاساز (Release agent) آغشته شدند تا نمونه‌های ساخته شده به راحتی از آن خارج شوند. سپس الیاف



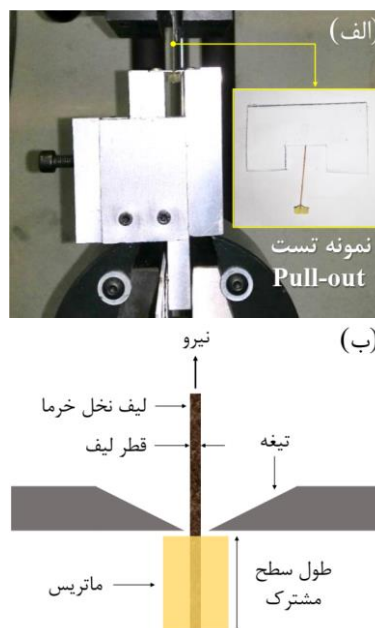
شکل ۴ (۴) تزریق اپوکسی داخل قالب بعد از قرار دادن الیاف



### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تاثیر فرآوری با NaOH بر روی سطح الیاف

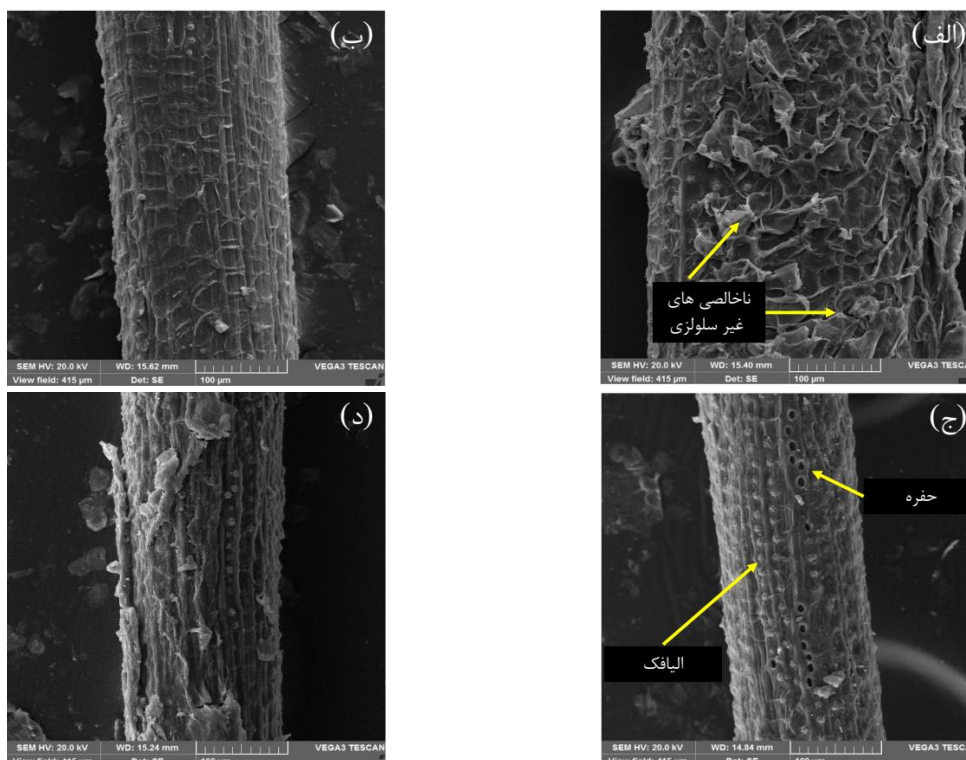
در شکل ۶ تصاویر SEM مربوط به سطح الیاف نخل خرما فرآوری نشده و فرآوری شده با غلظت‌های متفاوت NaOH نشان داده شده است. با مقایسه تصاویر به وضوح می‌توان اثر فرآوری بر سطح الیاف را مشاهده کرد. همانطور که در شکل ۶ الف مشخص است سطح الیاف فرآوری نشده مملو از آلودگی، چربی‌ها، لیگنین و واکس است. وجود این ناخالصی‌ها بعنوان یک لایه واسط بین سطح الیاف و ماتریس عمل کرده و به دلیل ساختار سست و ضعیف خود سبب کاهش چسبندگی بین الیاف و ماتریس می‌شود [12]. لایه واکسی در مطالعات پیشین بر روی بسیاری از الیاف طبیعی مانند الیاف نخل روغنی [36]، الیاف نارگیل [37] و الیاف نیشکر [38] نیز مشاهده شده است. پس از انجام فرآوری بر روی الیاف ناخالصی‌ها، چربی‌ها و لیگنین روی سطح که اکثراً در محلول قلیایی انحلال پذیر هستند از بین می‌روند [39]. همانطور که از شکل ۶ ب مشاهده می‌شود هر چند ناخالصی‌ها به مقدار بسیار زیاد پس از فرآوری با محلول ۱٪ از بین رفته است، اما هنوز لایه نازکی از وکس روی الیاف باقیمانده است. با افزایش غلظت محلول به ۳٪ (شکل ۶ ج) مشاهده می‌شود که تقریباً تمام ناخالصی‌ها از روی سطح لیف فرآوری شده از بین رفته است و ساختار اصلی و متخلل الیاف نخل خرما ظاهر شده است. اما با افزایش غلظت محلول فرآوری به ۵٪ (شکل ۶ د) الیاف دچار حمله قلیایی می‌شوند. به عبارت دیگر، سدیم هیدروکسید با حل کردن بیش از حد لیگنین به ساختار سطح الیاف آسیب می‌زند و باعث ظهور



شکل ۵) نمونه و فیکسچر تست Pull-out، (ب) نمای شماتیک تست Pull-out و اجزای مختلف آن

#### ۲-۶- تحلیل ریخت‌شناسی

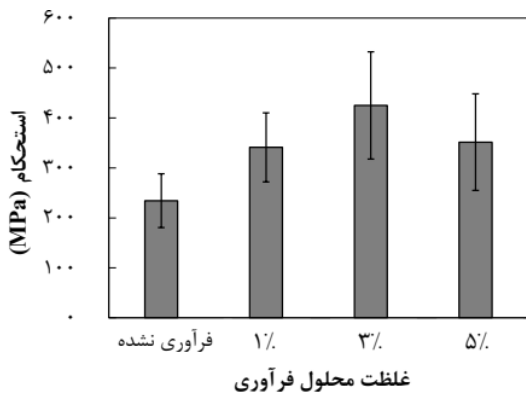
برای بررسی سطح الیاف و مشاهده تغییرات ایجاد شده پس از فرآوری قلیایی از تصاویر SEM استفاده شد. برای تهیه تصاویر SEM از یک میکروسکوپ MEGA3 استفاده شد. همچنین لایه‌ای از طلا برای پوشش نمونه‌ها به کار رفت و ولتاژ دستگاه نیز ۲۰ کیلو ولت بود. از الیاف خام و فرآوری شده و همچنین الیاف پس از انجام تست Pull-out تصاویر SEM تهیه شد.



شکل ۶) تصاویر SEM سطح الیاف نخل خرما (الف) فرآوری نشده، و فرآوری شده با محلول NaOH در غلظت‌های (ب) ۱٪، (ج) ۳٪ و (د) ۵٪

جدول ۱) مقایسه خواص مکانیکی الیاف نخل خرما خام و فرآوری شده با NaOH

الیاف	استحکام (MPa)	کرنش شکست (%)	مدول الاستیک (GPa)	p-value استحکام الیاف ( $\alpha=0.05$ )
فرآوری نشده	۳۳۴,۴۶±۵۳,۷	۹±۳	۷,۷±۱,۵	-
فرآوری با محلول ۱٪	۳۴۱,۱۱±۶۹,۰	۱۴±۳	۶,۸±۱,۶	۰,۰۰۰۰۲۳
فرآوری با محلول ۳٪	۴۲۵,۰۲±۱۰۷,۳	۱۴±۴	۱۰,۰±۲,۷	۰,۰۰۰۰۱۰
فرآوری با محلول ۵٪	۳۵۱,۶۱±۹۶,۷	۱۲±۲	۸,۱±۳	۰,۰۰۰۰۶۱۷



شکل ۸) تاثیر فرآوری قلیایی بر استحکام نخل خرما

استحکام نمونه‌های الیاف خام و الیاف فرآوری شده می‌باشد. از طرفی مدول الاستیک ابتدا با فرآوری قلیایی با غلظت ۱٪ کمی کاهش یافته ولی در فرآوری با غلظت ۳٪ با افزایش ۳۰ درصدی نسبت به الیاف خام به مقدار ۱۰ گیگاپاسکال رسیده است. ماکزیمم کرنش شکست نیز پس از فرآوری در محلول ۳٪ با افزایش ۵۵ درصدی به بیشترین مقدار خود رسیده است. اما هر سه خاصیت استحکام، مدول الاستیک و کرنش شکست با افزایش غلظت محلول فرآوری به ۵٪ دچار کاهش نسبت به خواص الیاف فرآوری شده در محلول ۳٪ شده‌اند.

با مقایسه نتایج بدست آمده با پژوهش‌های پیشین که بر روی الیاف طبیعی فرآوری شده انجام شده است می‌توان نتیجه گرفت که از بین رفتن لیگنین، همی سلولز و سایر ناخاصی‌های روی سطح الیاف، سبب جهت‌گیری مجدد میکروفیبریل‌ها در راستای محور الیاف شده است. از طرفی واکنش محلول سدیم هیدروکسید بر روی فیبریل‌های آمورف موجب تبدیل آن‌ها به فیبریل‌های کریستال می‌شود<sup>[30]</sup>. در نتیجه فرآوری الیاف طبیعی با محلول قلیایی موجب شکل‌گیری بهتر رشته‌های سلولزی و بهبود خواص مکانیکی الیاف می‌شود. همچنین، برخی مطالعات کاهش قطر الیاف و از بین رفتن لایه غیر موثر واکس پس از فرآوری را یکی از دلایل افزایش استحکام و مدول الاستیسیته دانسته‌اند<sup>[27,40]</sup>.

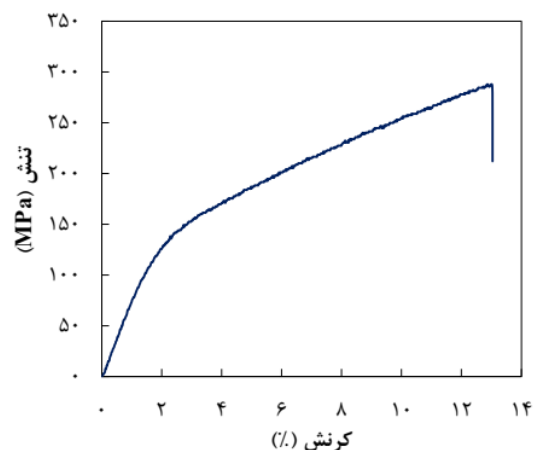
البته همانطور که در تصاویر SEM شکل ۶ نیز مشاهده شد، افزایش بیش از حد غلظت فرآوری سبب بروز آسیب در ساختار الیاف

ترک‌هایی روی آن می‌شود. با مشاهده مجدد الیاف فرآوری شده در غلظت ۳٪، می‌توان بر روی سطح الیاف، الیافک‌های (Trichomes) کوچکی را مشاهده کرد که درون حفره‌هایی (Grooves) روی سطح قرار دارند. این حفره‌ها و الیافک‌ها در الیاف فرآوری شده با محلول ۱٪ به دلیل باقی ماندن کمی از لایه واکسی قابل مشاهده نیستند. اما در الیاف فرآوری شده در محلول ۳٪ این حفره‌ها به وضوح قابل مشاهده است که در آن برخی الیافک به دلیل فرآوری از بین رفته است. این مسئله منجر به افزایش زبری سطح الیاف فرآوری شده با محلول ۳٪ نسبت الیاف فرآوری شده با محلول ۱٪ شده است که می‌تواند باعث ایجاد بهم پیوستگی مکانیکی بین الیاف و ماتریس و در نتیجه افزایش چسبندگی آنها شود<sup>[21,24,26]</sup>.

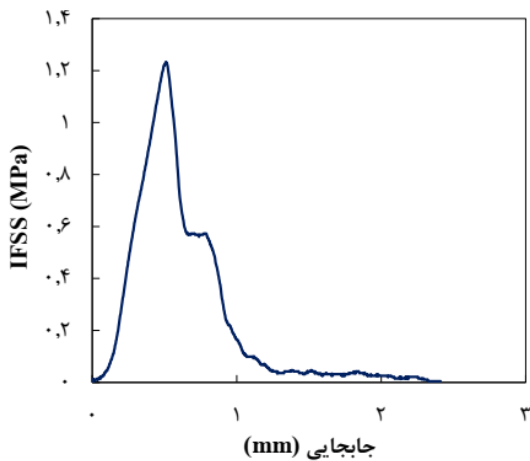
### ۲-۳- خواص مکانیکی الیاف فرآوری شده

نتایج تنش و کرنش الیاف با استفاده از داده‌های نیرو-جابجایی بدست آمده از تست کشش و همچنین اطلاعات مربوط به طول و سطح مقطع الیاف بدست می‌آیند. نمودار تنش-کرنش تست کشش تک لیف نخل خرما برای یک نمونه در شکل ۷ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود رفتار تنش-کرنش الیاف در ابتدا بصورت یک ناحیه خطی الاستیک و متعاقباً ناحیه تغییر شکل پلاستیک می‌باشد. منطقه پلاستیک تا نقطه شکست الیاف ادامه می‌یابد. از این نمودار خواص مکانیکی الیاف شامل استحکام نهایی، تنش تسلیم، و مدول الاستیسیته قابل استخراج است.

بررسی خواص مکانیکی الیاف پس از فرآوری و مقایسه آنها با الیاف فرآوری نشده نشان‌دهنده بهبود خواص مکانیکی پس از فرآوری است. همانطور که از جدول ۱ و شکل ۸ مشخص است استحکام الیاف فرآوری نشده از ۲۳۴ مگاپاسکال با افزایش ۸۱٪ به ۴۲۵ مگاپاسکال در الیاف فرآوری شده با محلول سدیم هیدروکسید ۳٪ رسیده است. مقادیر p-value محاسبه شده در جدول ۱ نیز نشان دهنده وجود اختلاف معنادار میان نتایج



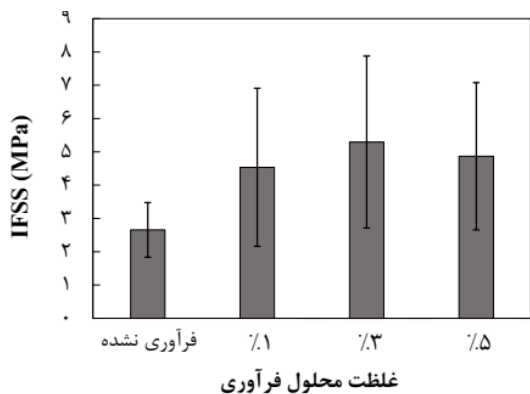
شکل ۷) نمودار تنش-کرنش یک نمونه از الیاف نخل خرما به دست آمده از تست کشش تک لیف



شکل ۱۰) نمودار تنش برشی بر حسب جابجایی به دست آمده از تست Pull-out

تنش برشی از ابتدا تا نقطه پیک نمودار تقریباً به صورت خطی افزایش یافته است. این بدان معناست که تا این نقطه، نیرو از ماتریس به الیاف انتقال می‌یابد و هنوز جدایشی بین آنها رخ نداده است. بیشینه مقدار تنش برشی به دست آمده از این نمودار (اولین پیک) به عنوان استحکام برشی در سطح مشترک (IFSS) در نظر گرفته می‌شود. در این حالت پیوند بین الیاف و ماتریس شکسته شده و الیاف شروع به جدا شدن از ماتریس می‌کند. بعد از این نقطه تنش به سرعت افت می‌کند که این به خاطر آزاد شدن انرژی کرنشی ذخیره شده می‌باشد [27,42]. نوسانات و کم و زیاد شدن تنش بعد از نقطه بیشینه ناشی از اصطکاک بین سطح لیف و ماتریس، و تغییرات سطح مقطع الیاف می‌باشد.

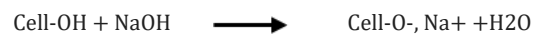
همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، فرآوری در همه غلظت‌ها سبب افزایش IFSS الیاف خرما با ماتریس گرماسخت شده است. این استحکام از ۲/۶ مگاپاسکال برای الیاف خام به مقدار ۴/۵۳ مگاپاسکال برای الیاف فرآوری شده با ۱٪ محلول، ۵/۲۹ مگاپاسکال برای الیاف فرآوری شده با ۳٪ محلول و ۴/۸۷ مگاپاسکال برای الیاف فرآوری شده با ۵٪ NaOH رسیده است. مقایسه p-value بدست آمده از تحلیل آماری این نتایج جدول ۲ نشان دهنده اینست که حداقل میان نتایج نمونه‌های



شکل ۱۱) استحکام برشی در سطح مشترک الیاف نخل خرما و ماتریس اپوکسی در غلظت‌های مختلف فرآوری

می‌شود. این مشاهده با نتایج تست کشش الیاف پس از افزایش غلظت فرآوری از ۳٪ به ۵٪ که در آن استحکام (شکل ۸) و مدول الاستیسیته الیاف (شکل ۹) دچار کاهش شده‌اند، همخوانی دارد [12,18,27].

به بیان دیگر، با افزایش غلظت و پیشرفت واکنش مقدار زیادی از لیگنین، که عموماً در سطح بیرونی الیاف قرار دارد، حل می‌شوند. در این مرحله، ناخالصی‌های سطحی و لیگنین به طور کلی حذف شده و مطابق واکنش زیر تعداد بیشتری از گروه‌های هیدروکسیل سطحی وارد واکنش با محلول هیدروکسید سدیم می‌شوند و سطح از نظر شیمیایی و فیزیکی آماده اتصال با ماتریس می‌شود:



با ادامه واکنش ساختار سلولز تغییر کرده و پیوند اکسیژن موجود در بین دو حلقه آروماتیک می‌شکند. در این حالت، ساختار کریستالی سلولز دچار آسیب و تورم شده و استحکام آن کاهش می‌یابد [41].

در واقع مهمترین خاصیت روش قلبایی جداسازی لیگنین، همی سلولز و ناخالصی‌ها از سلولز است که باعث افزایش سطح فعال و قابل واکنش الیاف و ماتریس پلیمری می‌شود. از معایب این روش نیز می‌توان به تشکیل نمک و تخریب الیاف (در غلظت بالا و زمان در معرض بودن طولانی) اشاره کرد. البته با تعیین غلظت، زمان و دمای بهینه می‌توان پیشرفت واکنش را کنترل نمود تا آسیبی به ساختار سلولز وارد نشود.

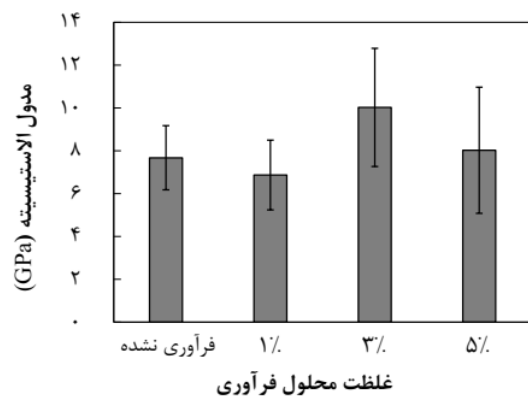
### ۳-۳- چسبندگی الیاف و ماتریس

تنش برشی در سطح مشترک الیاف و ماتریس را می‌توان با استفاده از رابطه ۱ محاسبه نمود

$$\tau = \frac{F}{\pi dl} \quad (1)$$

که در آن  $\tau$  تنش برشی در سطح مشترک،  $l$  طول الیاف احاطه شده توسط ماتریس،  $d$  قطر الیاف و  $F$  نیرویی است که از تست Pull-out بدست می‌آید. در این رابطه شکل الیاف به صورت استوانه‌ای فرض می‌شود.

نمودار تنش برشی-جابجایی تست Pull-out برای یک نمونه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود



شکل ۹) تاثیر فرآوری قلبایی بر مدول الاستیک الیاف نخل خرما



دیگر، با توجه به ویسکوزیته پایین ماتریس اپوکسی و مدت زمان تماس الیاف و ماتریس پیش از پخت آن، ماتریس اپوکسی به طور کامل در سطوح زبر و حفره‌های روی سطح الیاف نفوذ کرده و یک چسبندگی قوی بواسطه بهم پیوستگی مکانیکی و اصطکاک ایجاد می‌کند. این پدیده در مطالعات پیشین که بر روی انواع دیگر الیاف طبیعی انجام گرفته است نیز گزارش شده است [20-23,44]. در این مطالعات از افزایش زبری سطح بر اثر فرآوری شیمیایی و پلاسما، و در نتیجه افزایش قفل شونده مکانیکی به عنوان عامل افزایش IFSS ذکر شده است. در جدول ۳، تاثیر فرآوری های مختلف بر روی IFSS برخی از الیاف طبیعی نشان داده شده است.

#### ۳-۴- بررسی سطح الیاف پس از تست Pull-out

بررسی سطح الیاف پس از تست Pull-out می‌تواند برای درک بهتر چگونگی چسبندگی الیاف و ماتریس و همچنین تاثیر فرآوری بر روی آن بسیار سودمند باشد. شکل ۱۲ نشان دهنده تصاویر SEM سطح الیاف فرآوری نشده و فرآوری شده پس از تست Pull-out و جدایش ماتریس می‌باشد. از تصویر سطح لیف فرآوری نشده (شکل ۱۲ الف) می‌توان مشاهده کرد که پس از تست یک سطح تمیز و عاری از ماتریس باقی مانده است. این پدیده را می‌توان به اتصال ضعیف و ناسازگاری میان الیاف و ماتریس به سبب وجود ناخالصی ها در سطح الیاف پیش از آغشته سازی نسبت داد. در

**جدول ۳) مقایسه IFSS الیاف طبیعی مختلف مربوط به پژوهش‌های پیشین**

مرجع	نوع الیاف	نوع ماتریس	نوع فرآوری	قبل از فرآوری IFSS (MPa)	بعد از فرآوری IFSS (MPa)
[22]	بامبو	اپوکسی	سدیم هیدروکسید	۹/۱۴	۱۶/۲۸
[20]	نارگیل	اپوکسی	پلاسما مایع	۲/۸۰	۴/۷۴
[23]	درخت موز	اپوکسی	سدیم هیدروکسید	۱/۱۲	۳/۹۶
[21]	نخل خرما	اپوکسی	پلاسمای اکسیژن	۲/۸۰	۵/۲۰

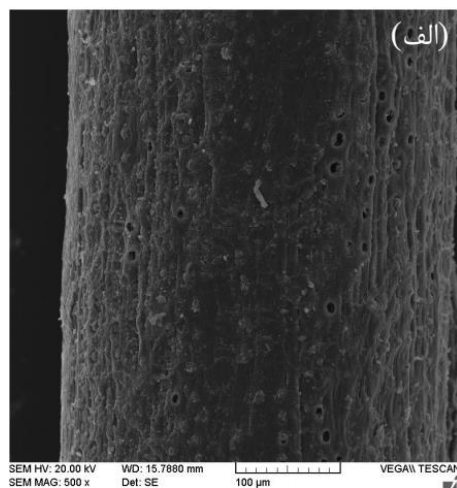
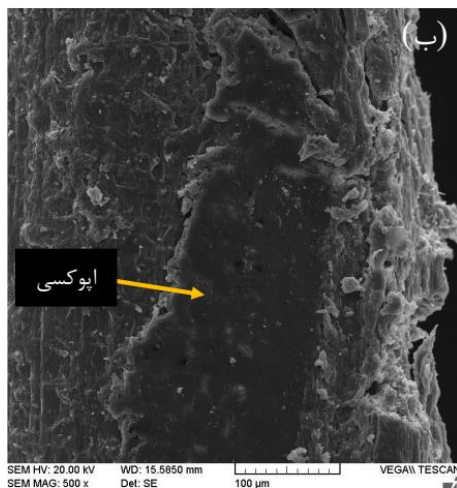
الیاف خام و الیاف فرآوری شده با محلول ۳٪ و ۵٪ اختلاف معناداری وجود دارد و این افزایش در استحکام برشی تصادفی نیست. مشابه نتایج مشاهده شده برای خواص مکانیکی، الیاف فرآوری شده با محلول ۳٪ با افزایش ۹۹ درصدی IFSS نسبت به الیاف فرآوری نشده، غلظت بهینه محلول می‌باشد.

در اتصال میان الیاف و ماتریس به طور کلی سه عامل موثر است، بهم پیوستگی مکانیکی (Mechanical interlocking)، نیروی جاذبه مولکولی (نیروی واندروالس و پیوند هیدروژنی) و پیوند شیمیایی بین الیاف و ماتریس. در ماتریس‌های گرماسخت، گروه هیدروکسیل (-OH) شرایط را برای برقراری پیوند هیدروژنی با سلولز و همی‌سلولز الیاف طبیعی فراهم می‌کند [43]. همچنین، ماتریس اپوکسی با سلولز موجود در الیاف طبیعی وارد واکنش شده و با آن پیوند شیمیایی، به صورت تشکیل پیوند کوالانسی، برقرار می‌کند [15]. این یکی از دلایل چسبندگی قوی در سطح مشترک ماتریس اپوکسی و الیاف طبیعی بعد از فرآوری و زدودن ناخالصی از روی سطح الیاف، و در نتیجه دسترسی بهتر به دیواره سلولی الیاف، است.

با مشاهده مجدد تصاویر SEM الیاف فرآوری شده و نشده در شکل ۶ می‌توان تا حدودی دلایل افزایش IFSS را متوجه شد. همانطور که قبلا اشاره شد فرآوری قلیایی باعث از بین رفتن واکس، چربی و ناخالصی‌ها از روی سطح الیاف می‌شود. با افزایش غلظت به ۳٪ این ناخالصی‌ها به طور کامل از بین می‌روند و حفره‌هایی بر روی سطح الیاف ظاهر می‌شود و زبری سطح افزایش می‌یابد. از سوی

**جدول ۲) نتایج تست Pull-out برای الیاف خام و فرآوری شده و مقدار p-value نسبت به نمونه خام**

نمونه ها	IFSS (MPa)	p-value برای نمونه خام و فرآوری شده ( $\alpha=0.05$ )
فرآوری نشده	۲/۶±۰/۸۲	-
فرآوری با محلول ۱٪	۴/۵۳±۲/۳۷	۰/۱۵۳
فرآوری با محلول ۳٪	۵/۲۹±۲/۵۸	۰/۰۲۴
فرآوری با محلول ۵٪	۴/۸۷±۲/۲۱	۰/۰۳۹



شکل ۱۲) سطح الیاف پس از تست Pull-out و جدایش ماتریس؛ الف) لیف خام و ب) لیف فرآوری شده با محلول سدیم هیدروکسید ۳٪

نتایج بدست آمده در این پژوهش می تواند در توسعه مواد مرکب سازگار با محیط زیست با استفاده از تقویت کننده‌ی الیاف نخل خرما سودمند باشد.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

**تاییدیه اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله حاصل فعالیت نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده آنها است.

**تعارض منافع:** هیچگونه تعارض منافی با اشخاص و سازمان‌ها وجود ندارد.

**سهم نویسندگان:** کلیه نویسندگان در تمامی مراحل تجربی و نگارش مقاله سهیم بوده‌اند.

**منابع مالی:** توسط دکتر محمد راوندی تامین گردید.

#### منابع

- 1- Nurul Fazita MR, Jayaraman K, Bhattacharyya D, Mohamad Haafiz MK, Saurabh CK, Hussin MH, HPS AK. Green composites made of bamboo fabric and poly (lactic) acid for packaging applications—A review. *Materials*. 2016;9(6):435.
- 2- Oushabi A. The pull-out behavior of chemically treated lignocellulosic fibers/polymeric matrix interface (LF/PM): a review. *Composites Part B: Engineering*. 2019;174:107059.
- 3- Hodzic A, Shanks R, editors. *Natural fibre composites: materials, processes and properties*. Woodhead Publishing; 2014.
- 4- Nirmal U, Yousif BF, Rilling D, Brevern PV. Effect of betelnut fibres treatment and contact conditions on adhesive wear and frictional performance of polyester composites. *Wear*. 2010;268(11-12):1354-70.
- 5- Ravandi M, Teo WS, Tran LQ, Yong MS, Tay TE. The effects of through-the-thickness stitching on the Mode I interlaminar fracture toughness of flax/epoxy composite laminates. *Materials & Design*. 2016;109:659-69.
- 6- Lee HP, Kureemun U, Ravandi M, Teo WS. Performance of interlaminar flax-carbon hybrids under bending. *Procedia Manufacturing*. 2020;43:658-65.
- 7- Faruk O, Bledzki AK, Fink HP, Sain M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in polymer science*. 2012;37(11):1552-96.
- 8- Fortea-Verdejo M, Bumbaris E, Burgstaller C, Bismarck A, Lee KY. Plant fibre-reinforced polymers: where do we stand in terms of tensile properties?. *International Materials Reviews*. 2017;62(8):441-64.
- 9- Trujillo E, Moesen M, Osorio L, Van Vuure AW, Ivens J, Verpoest I. Bamboo fibres for reinforcement in composite materials: Strength Weibull analysis. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014;61:115-25.
- 10- Shekar HS, Ramachandra M. Green composites: a review. *Materials Today: Proceedings*. 2018;5(1):2518-26.
- 11- Tran LQ, Minh TN, Fuentes CA, Chi TT, Van Vuure AW, Verpoest I. Investigation of microstructure and

واقع پیش از آنکه ماتریس با سطح الیاف تشکیل پیوندی دهد، به واکنش و ناخالصی‌های روی سطح لیف چسبیده است. آشکار شدن حفره‌های روی سطح لیف پس از جدایش ماتریس، در مقایسه با سطح لیف فرآوری نشده شکل ۵الف، نیز گواهی بر آن است که قسمتی از این ناخالصی‌ها به‌همراه ماتریس از روی لیف جدا شده است. از اینرو، مقدار IFSS بدست آمده برای الیاف فرآوری نشده را نمی توان بعنوان شاخصی برای اتصال واقعی بین ماتریس و الیاف در نظر گرفت.

شکل ۱۲ مربوط به سطح الیاف فرآوری شده با محلول سدیم هیدروکسید ۳٪ بعد از جدایش ماتریس است. همانطور که در شکل نیز نشان داده شده است باقی مانده ماتریس اپوکسی بر روی الیاف نشان دهنده شکست در خود ماتریس و در نتیجه چسبندگی بالا بین الیاف فرآوری شده و ماتریس اپوکسی است. علاوه بر افزایش نفوذ ماتریس در الیاف و افزایش زبری سطح در الیاف فرآوری شده، می‌توان گفت که فرآوری و از بین رفتن ناخالصی‌های روی سطح الیاف سبب می‌شود تا گروه‌های هیدروکسیل الیاف بیشتر در معرض تماس با ماتریس قرار بگیرند و زنجیره‌های پلیمری راحت‌تر بتوانند با آنها پیوند کووالانسی برقرار کنند.

#### ۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر تاثیر فرآوری قلیایی با استفاده از محلول سدیم هیدروکسید (NaOH) در غلظت‌های ۱٪، ۳٪، و ۵٪ بر روی سطح و خواص مکانیکی الیاف نخل خرما بررسی شد. همچنین تاثیر این فرآوری بر روی چسبندگی بین الیاف و ماتریس اپوکسی با استفاده از تست Pull-out مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس مشاهدات انجام شده، به طور کلی می توان به نتایج زیر اشاره کرد:

بررسی تصاویر SEM الیاف خام و فرآوری شده نشان داد کیفیت سطح بهبود یافته است و ناخالصی‌ها و آلودگی‌ها از روی سطح از بین رفته است. البته فرآوری الیاف با سدیم هیدروکسید ۵٪ باعث ایجاد آسیب در سطح الیاف شده است.

نتایج تست کشش الیاف خام و فرآوری شده با استفاده از محلول قلیایی سدیم هیدروکسید نشان دهنده افزایش خواص مکانیکی الیاف پس از فرآوری بود. بیشترین افزایش خواص مکانیکی در فرآوری الیاف به وسیله محلول با غلظت ۳٪ مشاهده شد که در آن استحکام الیاف ۸۱٪، مدول الاستیسته ۳۰٪، و کرنش نهایی ۵۵٪ افزایش یافته بود.

نتایج تست Pull-out نشان‌دهنده تاثیر زیاد فرآوری بر روی بهبود چسبندگی بین الیاف و ماتریس بود. بیشینه مقدار IFSS در الیاف فرآوری شده به وسیله محلول با غلظت ۳٪ مشاهده شد بطوریکه پس از فرآوری مقدار IFSS به میزان ۹۹٪ افزایش یافت. افزایش غلظت محلول فرآوری به ۵٪ به دلیل آسیب اعمال شده به سطح الیاف، منجر به افزایش بیشتر مقدار IFSS نشد.

- 26- Shalwan A, Yousif BF. Investigation on interfacial adhesion of date palm/epoxy using fragmentation technique. *Materials & Design*. 2014;53:928-37.
- 27- Oushabi A, Sair S, Hassani FO, Abboud Y, Tanane O, El Bouari A. The effect of alkali treatment on mechanical, morphological and thermal properties of date palm fibers (DPFs): Study of the interface of DPF-Polyurethane composite. *South African Journal of Chemical Engineering*. 2017;23:116-23.
- 28- Mirabimoghaddam MH. Investigation of Cis Palamfiber on the mechanical properties of Concrete. *Journal of Structural and Construction Engineering*. 2021;8(3):169-76.
- 29- Kashizadeh R, Esfandeh M, Rezadoust AM, Sahraeian R. Physico-mechanical and thermal properties of date palm fiber/phenolic resin composites. *Polymer Composites*. 2019;40(9):3657-65.
- 30- Van de Weyenberg I, Truong TC, Vangrimde B, Verpoest I. Improving the properties of UD flax fibre reinforced composites by applying an alkaline fibre treatment. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2006;37(9):1368-76.
- 31- Aziz SH, Ansell MP. The effect of alkalization and fibre alignment on the mechanical and thermal properties of kenaf and hemp bast fibre composites: Part 1-polyester resin matrix. *Composites science and technology*. 2004;64(9):1219-30.
- 32- Herrera-Franco P, Valadez-Gonzalez A. A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*. 2005;36(8):597-608.
- 33- Riedel U. *Biocomposites*. *Polymer Science: A Comprehensive Reference*, Elsevier; 2012, p. 295-315.
- 34- Osorio L, Trujillo E, Van Vuure AW, Verpoest I. Morphological aspects and mechanical properties of single bamboo fibers and flexural characterization of bamboo/epoxy composites. *Journal of reinforced plastics and composites*. 2011;30(5):396-408.
- 35- Bourmaud A, Dhakal H, Habrant A, Padovani J, Siniscalco D, Ramage MH, Beaugrand J, Shah DU. Exploring the potential of waste leaf sheath date palm fibres for composite reinforcement through a structural and mechanical analysis. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2017;103:292-303.
- 36- Tanzim N, Nbhah S, Liew TH, Chin CW, Yousif BF. ANN for tribological applications. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition 2009*:43864:13-16.
- 37- Arrakhiz FZ, Malha M, Bouhfid R, Benmoussa K, Qaiss A. Tensile, flexural and torsional properties of chemically treated alfa, coir and bagasse reinforced polypropylene. *Composites Part B: Engineering*. 2013;47:35-41.
- 38- El-Tayeb NS. Development and characterisation of low-cost polymeric composite materials. *Materials & Design*. 2009;30(4):1151-60.
- 39- Mohanty AK, Misra M, Drzal LT. Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: an overview. *Composite interfaces*. 2001;8(5):313-43.
- tensile properties of porous natural coir fibre for use in composite materials. *Industrial Crops and Products*. 2015;65:437-45.
- 12- Alsaeed T, Yousif BF, Ku H. The potential of using date palm fibres as reinforcement for polymeric composites. *Materials & Design*. 2013;43:177-84.
- 13- Gholami M, Ahmadi M, Tavanaie M, Mehrizi MK. Mechanical properties of date palm fiber reinforced polymer composites: a review. *Basparesh*. 2017;7(1):82-93.
- 14- Al-Oqla FM, Sapuan SM. Natural fiber reinforced polymer composites in industrial applications: feasibility of date palm fibers for sustainable automotive industry. *Journal of Cleaner Production*. 2014;66:347-54.
- 15- Khiari R, Mhenni MF, Belgacem MN, Mauret E. Chemical composition and pulping of date palm rachis and *Posidonia oceanica*-A comparison with other wood and non-wood fibre sources. *Bioresource Technology*. 2010;101(2):775-80.
- 16- Pickering K, editor. *Properties and performance of natural-fibre composites*. Elsevier; 2008.
- 17- Nasser RA, Salem MZ, Hiziroglu S, Al-Mefarrej HA, Mohareb AS, Alam M, Aref IM. Chemical analysis of different parts of date palm (*Phoenix dactylifera L.*) using ultimate, proximate and thermo-gravimetric techniques for energy production. *Energies*. 2016;9(5):374.
- 18- Alawar A, Hamed AM, Al-Kaabi K. Characterization of treated date palm tree fiber as composite reinforcement. *Composites Part B: Engineering*. 2009;40(7):601-6.
- 19- Dhakal H, Ismail SO. *Sustainable Composites for Lightweight Applications*. Woodhead Publishing; 2020.
- 20- Putra AE, Renreng I, Arsyad H, Bakri B. Investigating the effects of liquid-plasma treatment on tensile strength of coir fibers and interfacial fiber-matrix adhesion of composites. *Composites Part B: Engineering*. 2020;183:107722.
- 21- Gholami M, Ahmadi MS, Tavanaie MA, Mehrizi MK. Effect of oxygen plasma treatment on tensile strength of date palm fibers and their interfacial adhesion with epoxy matrix. *Science and Engineering of Composite Materials*. 2018;25(5):993-1001.
- 22- Huang JK, Young WB. The mechanical, hygral, and interfacial strength of continuous bamboo fiber reinforced epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*. 2019;166:272-83.
- 23- Zin MH, Abdan K, Norizan MN, Mazlan N. The Effects of Alkali Treatment on the Mechanical and Chemical Properties of Banana Fibre and Adhesion to Epoxy Resin. *Pertanika Journal of Science & Technology*. 2018;26(1).
- 24- Wong KJ, Yousif BF, Low KO. The effects of alkali treatment on the interfacial adhesion of bamboo fibres. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2010;224(3):139-48.
- 25- Syduzzaman M, Al Faruque MA, Bilisik K, Naebe M. Plant-based natural fibre reinforced composites: A review on fabrication, properties and applications. *Coatings*. 2020;10(10):973.

- 40- Abdal-Hay A, Suardana NP, Jung DY, Choi KS, Lim JK. Effect of diameters and alkali treatment on the tensile properties of date palm fiber reinforced epoxy composites. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2012;13(7):1199-206.
- 41- Viel M, Collet F, Lanos C. Development and characterization of thermal insulation materials from renewable resources. *Construction and Building Materials*. 2019;214:685-97.
- 42- Yousif BF, Wong KJ, El-Tayeb NS. An investigation on tensile, compression and flexural properties of natural fibre reinforced polyester composites. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition 2007*:42975:619-624.
- 43- Mohnty AK, Misra M, Drzal LT, Selke SE, Harte BR, Hinrichsen G. Natural fibers, biopolymers, and biocomposites: an introduction. *Natural Fibers, Biopolymers and Biocomposites*, Taylor & Francis: Boca Raton. 2005.
- 44- Valadez-Gonzalez A, Cervantes-Uc JM, Olayo RJ, Herrera-Franco PJ. Effect of fiber surface treatment on the fiber-matrix bond strength of natural fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*. 1999;30(3):309-20.